



Caractéristiques d'un mortier à base de chaux et de poudre de roche pour la restauration des monuments.

Muzahim Al-Mukhtar, Kévin Beck

► To cite this version:

Muzahim Al-Mukhtar, Kévin Beck. Caractéristiques d'un mortier à base de chaux et de poudre de roche pour la restauration des monuments.. Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen, 2005, Meknès, Maroc. 6p. hal-00093494

HAL Id: hal-00093494

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-00093494>

Submitted on 13 Sep 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CARACTERISTIQUES D'UN MORTIER A BASE DE CHAUX ET DE POUDRE DE ROCHE POUR LA RESTAURATION DES MONUMENTS

Muzahim AL-MUKHTAR¹, Kevin BECK^{1,2}

¹Centre de Recherche sur la Matière Divisée, Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, CNRS - CRMD, 1B rue de la Férellerie, 45071 Orléans Cedex 2, France.

²Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, CNRS-ISTO, 1A rue de la Férellerie, 45071 Orléans Cedex 2, France.

RESUME : Cette communication présente les caractéristiques hydriques et mécaniques d'un mortier à base de chaux hydraulique et de poudre de tuffeau (pierre calcaire employée dans la construction des châteaux dans le Val de Loire – France). Les différents tests mécaniques et hydriques sur les échantillons de mortier confectionnés avec différents pourcentages de chaux hydraulique ont pour objectif de déterminer le mortier compatible avec le tuffeau.

MOTS-CLÉS : mortier, chaux, tuffeau.

ABSTRACT: *This communication shows the first results about the mechanical properties and water transfer behaviour for lime-based mortars prepared with stone powder of the studied stone tuffeau. This kind of mortar can be used for the restoration of historic buildings. The aim of this study is to research compatibility between the stone and the mortar for the mechanical properties and the water transfer behaviour.*

KEYWORDS: mortar, lime, tuffeau.

INTRODUCTION

Divers types de mortier sont utilisés dans la construction et la restauration des monuments. Le choix du mortier s'appuie sur plusieurs critères : esthétique, scientifique et économique. Par principe, les acteurs de ce domaine pensent qu'on doit utiliser des mortiers moins résistants, plus souples, plus poreux afin de minimiser la dégradation future de la pierre en œuvre par rapport au mortier. Ceci reflète une forme de compatibilité désignée empiriquement. Dans une recherche de compatibilité entre le mortier et la pierre en œuvre, un ensemble de paramètres physiques, chimiques et mécaniques doit être examiné (AL-SAAD *et al.*, 2000 ; BINDA *et al.*, 2003 ; LANAS *et al.*, 2003). Avec le développement industriel du ciment, la restauration des monuments a été réalisée en utilisant du mortier de ciment comme liant entre les pierres. Ceci a conduit à des dégradations importantes au niveau des constructions restaurées. En effet, le ciment agresse chimiquement la pierre et les sels produits sont amenés à la zone de jointure avec l'eau par capillarité. De plus, les mortiers au ciment sont très rigides et adhèrent fortement à la pierre. La pierre se dégrade alors au niveau de l'interface.

L'objectif de l'étude réalisée est de concevoir un mortier avec des produits naturels et dont la composition chimique est très proche de la roche mère. La chaux qui possède de nombreuses propriétés intéressantes a été l'un des premiers liants utilisés dans le monde (BIANCHINI *et al.*, 2003). Beaucoup de civilisations anciennes l'ont utilisée (Incas, Mayas, Chinois, Mongols, Egyptiens, Grecs, Romains, ...). Les agrégats utilisés sont issus des débris de roche. La pierre choisie dans cette étude est le Tuffeau, pierre principale de construction des châteaux de la Loire en France. Cette pierre a été utilisée durant de nombreux siècles : sa légèreté et sa facilité d'utilisation pour la sculpture, ainsi que sa blancheur ont été ses principales qualités.

Le mortier est donc fabriqué avec de la poudre de tuffeau liée à de la chaux hydraulique et de l'eau. Sur la pâte durcie, plusieurs paramètres hydriques (imbibition et rétention d'eau) et mécaniques (résistance en compression et en traction) sont testés. Les résultats obtenus sur les échantillons du mortier sont comparés à ceux de la pierre d'origine afin de juger de la compatibilité pierre – mortier. Enfin, des critères de compatibilité pierre – mortier sont avancés dans le cadre des restaurations des monuments construits avec du tuffeau.

1. Matériaux et Méthodes

1.1 . Le tuffeau et la chaux

Le tuffeau est une roche sédimentaire marine qui recouvre tout le Val de Loire. Cette couche géologique s'est formée durant le crétacé supérieur. Le tuffeau utilisé dans cette étude a été extrait dans une carrière souterraine à St-Cyr-en-Bourg (Maine-et-Loire, France).

La caractérisation de ce tuffeau blanc a été déterminée (BECK *et al.*, 2003) grâce à différentes techniques complémentaires afin d'évaluer qualitativement et quantitativement les différents éléments : diffraction des rayons-X, analyses thermogravimétriques et microscopie électronique. Les phases cristallines principales sont la calcite CaCO_3 et la silice SiO_2 qui se présente sous deux formes cristallines (le quartz et l'opale Cristobalite-Tridymite). De plus, on constate la présence des minéraux minoritaires comme des argiles et des micas. La taille et la forme des grains constitutifs de la pierre sont assez variées. On trouve de volumineux grains de quartz, d'argile, de calcite sparitique, de paillettes de micas agencés avec plusieurs types de grains très fins comme la calcite micritique, les sphérules d'opale CT

La poudre de tuffeau est obtenue par broyage de la roche dans un mixeur, puis par tamisage pour avoir une poudre assez homogène et fine (tamis de 315 μm).

La chaux hydraulique utilisée est commercialisée par la société « Lafarge » : elle est naturelle, blanche et référencée NHL – 3,5 z.

Tableau 1 : Caractéristiques principales du tuffeau

Composition Minéralogique	Calcite $\cong 50\%$, Quartz $\cong 10\%$ Opale CT $\cong 30\%$, Argile - Mica $\cong 10\%$
Densité des grains minéraux (g/cm^3)	2.55
Densité à l'état sec (g/cm^3)	1.31
Porosité	$\cong 48\%$
Résistance à la compression	6 à 10 MPa
Distribution porale	$D > 0,1 \mu\text{m} = 24\%$ $0,1 \mu\text{m} < D < 1 \mu\text{m} = 15\%$ $1 \mu\text{m} < D < 10 \mu\text{m} = 53\%$ $D > 10 \mu\text{m} = 8\%$

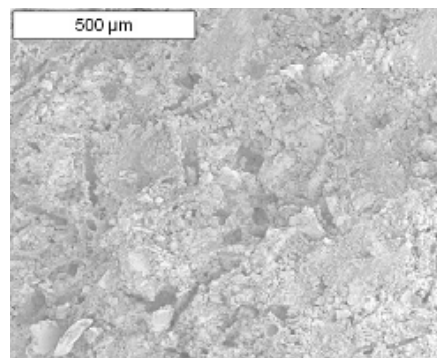


Figure 1 : Image du tuffeau obtenue par Microscopie Electronique à Balayage

1.2 Confection des éprouvettes

Afin de déterminer la composition du mortier qui aura les caractéristiques mécaniques et hydriques les plus proches de celles du tuffeau, plusieurs pourcentages de chaux ont été utilisés allant de 5% à 90% pour la préparation des échantillons. De plus, les échantillons ont été confectionnés selon trois modes:

1. éprouvettes sans compaction
2. éprouvettes avec compaction sous un poids égal à 7,5 kg (poids approximativement égal à la charge imposée par un mur d'une hauteur de l'ordre de 3m).

Les échantillons préparés sont cylindriques : 8 cm de hauteur et 4 cm de diamètre.

3. éprouvette d'une épaisseur d'un cm entre deux morceaux cylindriques de pierre de tuffeau (chacun fait 3,5 cm de hauteur et 4 cm de diamètre)

La maturation des échantillons est réalisée en milieu hermétique avec un taux d'humidité proche de 100%.

1.3. Méthodes – Tests réalisés

1.3.1 TESTS DE COMPRESSION ET DE TRACTION

Le test de compression (Norme AFNOR P94-420) est réalisé sur une éprouvette cylindrique à section transversale circulaire d'éclatement minimale de 2. Un effort de compression croissant est appliqué, dans l'axe de l'éprouvette, jusqu'à la rupture. Le test de traction par fendage (essai

brésilien - Norme AFNOR P94-422) est réalisé sur des éprouvettes cylindriques (diamètre 40 mm et hauteur 40 mm) placées horizontalement. Un effort croissant est appliqué suivant les génératrices de l'éprouvette cylindrique jusqu'à la rupture.

Les essais de compression et de traction ont été effectués après 28 jours de maturation des éprouvettes grâce à une presse Instron 4485 avec une vitesse de chargement de 0,05 mm/min. Tous les essais ont été réalisés à l'état sec (48h dans une étuve à 105°C, puis 6h dans un dessiccateur à humidité quasi-nulle contrôlés par de l'anhydride phosphorique P₂O₅ pour le retour à la température ambiante).

1.3.2 TEST D'IMBIBITION

Dans cet essai (Norme AFNOR B10-613), des échantillons cylindriques de section (S) préalablement séchés (diamètre : 40 mm / hauteur : 80 mm) sont placés dans une cuve hermétique au fond de laquelle le niveau d'eau distillée est maintenu constant pendant toute la durée du test. A intervalles de temps croissants (t), les échantillons sont pesés et la hauteur de la frange capillaire (h) est mesurée au pied à coulisse. Deux coefficients d'imbibition A et B correspondent aux pentes des courbes de prise de masse (dm) et d'ascension du front capillaire en fonction de la racine carrée du temps peuvent être calculés :

$$h = B\sqrt{t} \quad \& \quad \frac{dm}{S} = A\sqrt{t}$$

Enfin, la porosité capillaire qui représente le volume d'eau par rapport au volume de la pierre est liée directement aux deux coefficients d'imbibition : $N_c = A / (B \gamma_w)$



Figure 2 : Echantillon de mortier préparé avec 5% de chaux lors d'un test d'imbibition

1.3.3 MESURE DE LA CAPACITE DE RETENTION D'EAU

La rétention d'eau a été étudiée dans toute la gamme de succion (0-600 MPa, soit en humidité relative de 100% à presque 0%) utilisant des techniques complémentaires d'imposition (BECK *et al.*, 2003) : tensiométrie (0-100 kPa), tension osmotique (100-1500 kPa) et solutions salines saturées (2,7 MPa -300 MPa).

3. RESULTATS et ANALYSE

3.1 Comportement mécanique

Les tests de compression et de traction (figures 3 et 4) permettent de déterminer la résistance à la rupture (figures 5 et 6).

Sur certains échantillons, on peut observer l'instant où les premières fissures apparaissent. Ceci se traduit sur la courbe contrainte-déformation (σ - ϵ) par des cycles légers de diminution suivie d'augmentation de la contrainte axiale avec les déformations de l'échantillon. On constate également que la contrainte maximale à la rupture est souvent bien marquée sur la courbe σ - ϵ .

Les principales observations sont les suivantes :

- Globalement, plus le pourcentage de chaux augmente, plus la résistance en compression et en traction augmente dans les échantillons préparés avec ou sans compactage. En effet, le rôle liaissant de la chaux confère au mortier une ductilité plus importante: ainsi, sa zone d'élasticité est plus étendue, il résiste ainsi à des résistances mécaniques plus élevées.
- La compaction des échantillons induit une amélioration importante de la résistance mécanique des mortiers confectionnés.
- En compression comme en traction, les résistances des mortiers confectionnés avec plus de 30% de chaux semblent donner des valeurs intéressantes (proches de celles du tuffeau).

Cependant, il faut noter que ces valeurs de résistance sont obtenues après une maturation d'uniquement 28 jours et que de nombreux auteurs ont constaté une amélioration de la résistance mécanique des mortiers à base de chaux avec le temps de maturation.

LANAS & ALVAREZ (2003) et LANAS *et al.* (2004) ont montré que la résistance en compression après un an de mûrissement est trois fois plus élevée que celle obtenue après 28 jours. BROMBLET (2000) a présenté des résultats de la résistance en flexion et en compression qui s'améliorent de 16% à 211% entre 28 et 120 jours. Donc, la résistance mécanique du mortier à base de chaux s'améliore avec le temps de mûrissement et on peut ainsi supposer que les mortiers confectionnés avec plus de 10% de chaux pourraient présenter des résistances mécaniques proche de celle du tuffeau après quelques mois de maturation.

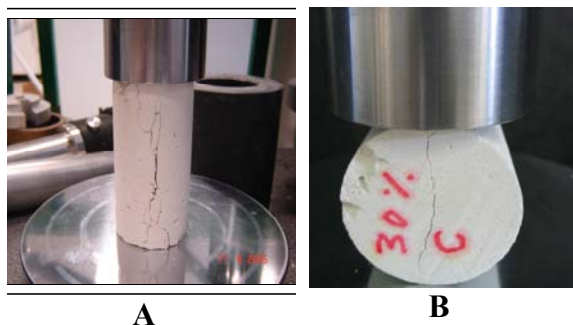


Figure 3 : Echantillons de mortiers lors de test de compression simple (A) et de traction brésilien (B)

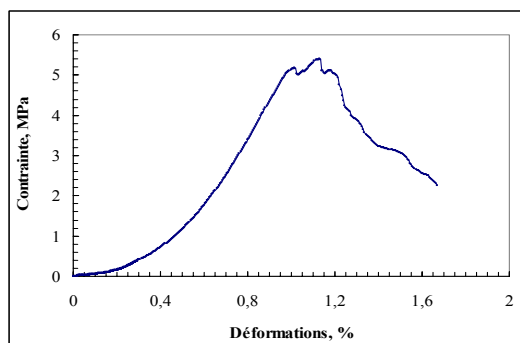


Figure 4 : Contrainte –Déformation lors d'un essai de compression simple sur un mortier fabriqué avec 50% de chaux

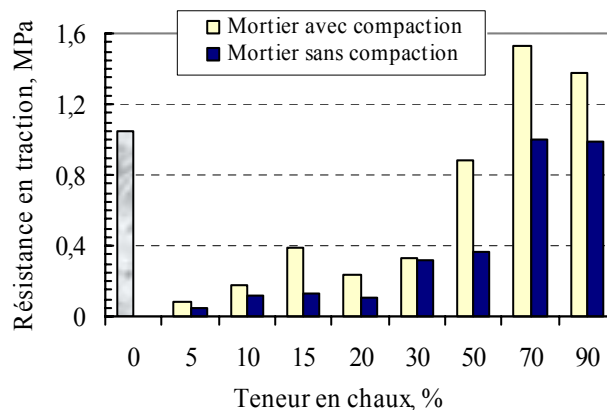
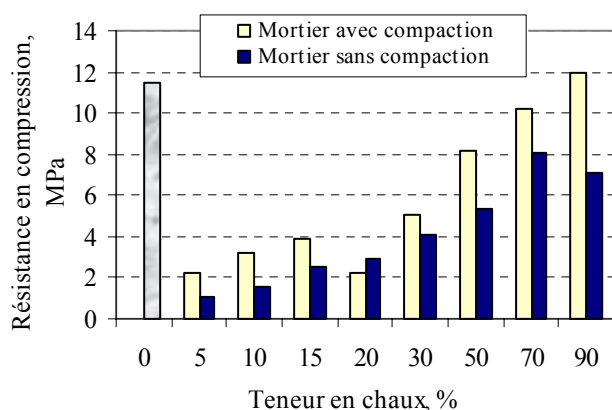


Figure 5 & 6 : Résistances mécaniques des mortiers préparés avec et sans compaction.

3.3. Comportement hydrique du mortier durci

3.3.1. Test d'imbibition

Les différents tests d'imbibition réalisés sur le mortier montrent clairement le caractère poreux des mortiers confectionnés avec ou sans chaux quelque soit la teneur en chaux. Ainsi, le temps nécessaire à la réalisation d'un tel essai ne dépasse jamais une heure (figure 7). De plus, les courbes d'imbibition obtenues sont parfaitement linéaires ce qui démontre l'homogénéité des échantillons préparés. Les résultats des tests d'imbibition (figure 8) montrent que plus la teneur en chaux augmente dans les mortiers préparés avec ou sans compaction plus les coefficients d'imbibition massique et visuelle s'éloignent de ceux du tuffeau. On constate comme attendu que les deux coefficients sont supérieurs dans les échantillons sans compactage par rapport aux échantillons compactés.

Enfin, le calcul de la porosité capillaire permet de constater que celle-ci varie entre 40% à 44% pour tous les échantillons de mortier fabriqués. Ces valeurs sont assez proches et légèrement plus grandes que la porosité capillaire du tuffeau testé, 38%.

En se basant sur ces résultats, on peut dire que le mortier compatible avec le tuffeau ne devrait pas comporter un pourcentage élevé de chaux hydraulique.

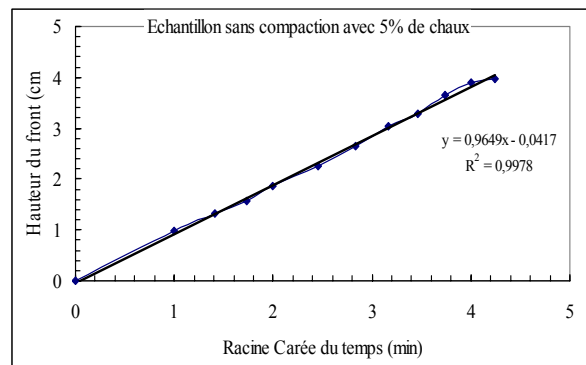


Figure 7 : Cinétique d'imbibition pour un échantillon de mortier

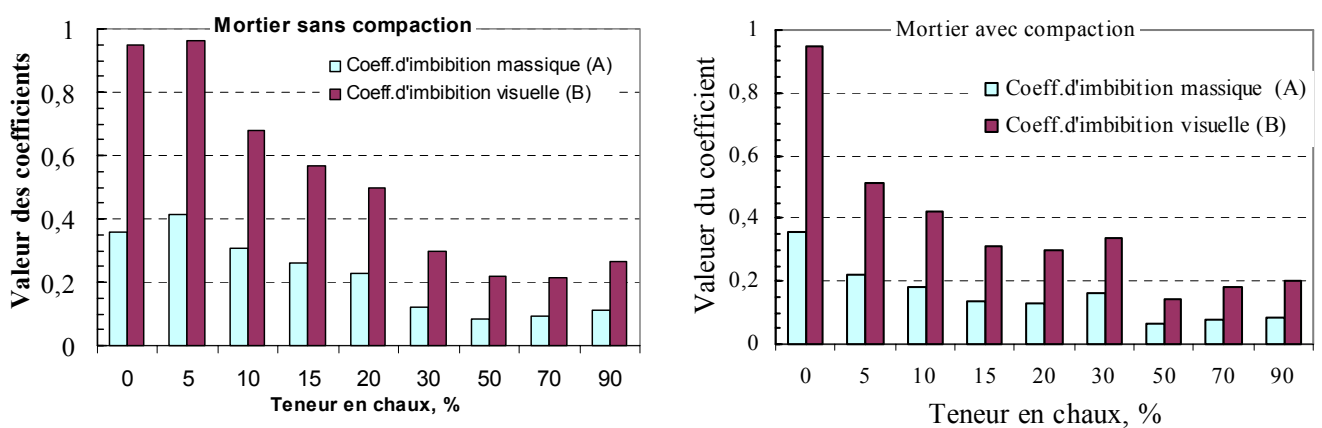


Figure 8 : Coefficients d'imbibition massique et visuelle dans les mortiers préparés

3.3.2. Courbe de rétention d'eau (courbe de sorption - désorption)

La rétention d'eau permet de juger de la capacité de la pierre ou du mortier à stocker l'eau en fonction des variations de l'humidité relative (ou de la succion) environnante. De ces mouvements d'eau dépend l'altération (ou moins en partie) des monuments construits en pierre. Si l'eau reste plus longtemps dans la pierre, cela pourrait occasionner la dissolution de la calcite des pierres calcaires. Aussi, avec les mouvements d'eau, la calcite dissoute peut être transportée vers les surfaces extérieures. Ainsi, cette propriété qui conditionne le comportement hydrique des pierres et des mortiers induit une inhomogénéité et des altérations localisées grandissantes avec le temps (AL-MUKHTAR & BECK, 2005).

Les premiers résultats obtenus sur deux mortiers ayant 5 et 50% de chaux testés après 28 jours de maturation montrent :

- l'augmentation de la teneur en eau dans les mortiers avec la diminution de la succion
- le mortier contenant moins de chaux présente un comportement plus proche du tuffeau.

Il convient de déterminer la capacité de rétention d'eau pour les autres teneurs en chaux ainsi que pour des temps de mûrissement plus importants que 28 jours afin de mieux connaître l'évolution du critère de compatibilité mortier – pierre.

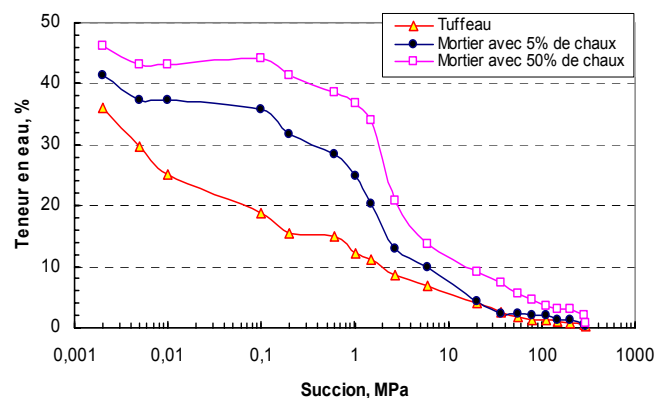


Figure 9 : Succion – Teneur en eau

6. Discussion et Conclusion

Les résultats préliminaires présentés dans cette communication ne nous permettent pas à ce stade de déterminer finement le mortier parfaitement compatible avec la pierre de tuffeau. Cependant, des avancées importantes peuvent être relevées à partir des résultats obtenus :

1. En utilisant un mortier composé uniquement de chaux et des agrégats du tuffeau, on peut considérer que la compatibilité chimique est acquise entre le mortier et la pierre.
2. Les propriétés mécaniques déterminées après 28 jours de durcissement semblent montrer que les résistances mécaniques sont très intéressantes par rapport à celles du tuffeau. Elles peuvent encore s'améliorer avec le temps et donc le mortier confectionné avec une teneur en chaux même faible ($\geq 10\%$) peut satisfaire les critères de compatibilité mortier - tuffeau. Ce facteur ne semble pas, à ce niveau de la recherche réalisée, être un paramètre déterminant dans le choix du pourcentage de chaux à utiliser.
3. Les deux propriétés hydriques testées montrent que la teneur en chaux dans le mortier fabriqué devrait rester modeste pour ne pas compromettre les mouvements d'eau dans le mortier et entre le mortier et la pierre. En effet, l'augmentation du pourcentage de chaux induit une porosité totale dans le mortier plus forte et une distribution porale qui s'écarte de celle de la roche initiale. D'autres tests sont en cours de réalisation et permettront d'identifier le mortier le plus adapté au tuffeau testé :

- Tests d'adhérence entre le mortier et la pierre : à cet effet, deux types d'échantillons ont été préparés : échantillon « sandwich » - mortier compris entre deux échantillons cylindriques de pierres et échantillon de mortier appliqué (sans compaction et avec compaction) uniquement sur une seule pierre.
- Tests de comportement hydrique et mécanique à moyen et à long terme. En effet, dans les édifices en pierre où la compatibilité pierre-mortier conditionne la réussite et la durabilité de la construction ou de la restauration, le mortier doit être aussi durable et résistant que la pierre. Ainsi, des conditions environnementales variées telles que les variations de température et l'effet des polluants atmosphériques sont à simuler et le comportement du mortier doit être suivi à l'échelle microscopique à l'aide de diverses techniques: diffraction des rayons X (DRX), Analyse Thermo Gravimétrique (ATG), Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et Microscopie Electronique à Transmission (MET).

Ces données sont la première étape d'une étude macroscopique approfondie (propriétés mécaniques et des transferts hydriques) couplée à une caractérisation physico-chimique et à une analyse du milieu poreux des mortiers fabriqués dont l'objectif est d'obtenir le mortier le plus adapté au tuffeau testé.

Bibliographie

- Al-Mukhtar M., Beck K. (2005). « Deux pierres de porosité totale semblable et de comportement dissemblable ». *Pierre Actual revue internationale des métiers de la pierre Editions Le Mausolée*, numéro 823, p. 58-65
- Al-Saad Z., Abdel-Halim M.A.H. (2001) « Laboratory evaluation of various types of mortars for the conservation of Qasr al-Bint monument, Petra-Jordan » *Engin. Structures*, vol. 23, p. 926-933.
- Beck K., Al-Mukhtar M., Rozenbaum O., Rautureau M. (2003) « Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire Valley-France ». *Building and Environment*, vol. 38, p.1151-1162.
- Bianchini G., Marrocchino E., Vaccaro C. (2004) « Chemical and mineralogical characterization of historic mortars in Ferrara (northeast Italy) » *Cement and Concrete Research*, vol. 34, No. 8, p. 1471-1475..
- Binda L., Baronio G., Tiraboschi C., Tedeschi C. (2003) « Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto » *Construction and Building Materials*, vol. 17, p. 629-639.
- Lanás J., Alvarez J.I. (2003) « Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior » *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 1867-1876.
- Lanás J., Pérez J.L., Bello M.A., Alvarez Galino J.I. (2004). « Mechanical properties of hydraulic lime- based mortars », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, p. 2191-2201.
- Bromlet Ph. (2000). « Evaluation of the durability and compatibility of traditional repair lime-based mortars on three limestones », *Int. Journal for Restoration of Building Monuments*, vol. 6, No. 5, p. 513-528.